

«Rev. Mod. Phys.», 1984, v. 56, p. 755; Ott H. R., «Progress in Low Temperature Physics», 1987, v. 11, p. 217; Frontiers and borderlines in many-particle physics, Amst., 1988 (International School «Enrico Fermi», v. 104, eds. J. R. Schrieffer, R. A. Broglia). К. А. Кикоин.

**ТЯЖЁЛЫЙ ЛЕПТОН** — общее название для группы элементарных частиц, заряженных или нейтральных, обладающих свойствами *лептонов* и массой, заметно превышающей массу мюона (105,66 МэВ). Первой и единственной обнаруженной в этой группе частицей является заряженный *тау-лептон* ( $m_\tau = 1777$  МэВ), др. Т. л. пока не обнаружены. Поэтому  $\tau$ -лептон иногда именуют просто Т. л. Однако ввиду возможности открытия др. Т. л. такое отождествление нецелесообразно. На нач. 90-х гг. эксперим. ограничения снизу на массы возможных дополнит. Т. л. [заряженных ( $L^\pm$ ) и нейтральных ( $L^0$ )] следующие:

$$m_{L^\pm} > 44,3 \text{ ГэВ},$$

$$m_{L^0} > 42,7 \text{ ГэВ}$$

А. А. Комар.

**ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ УСКОРИТЕЛИ** — мощные ускорит. установки, предназначенные для получения интенсивных пучков тяжёлых ионов (элементов тяжелее лития) в широком диапазоне масс и энергий. Использование пучков ускоренных тяжёлых ионов стало в кон. 20 в. осн. методом исследований в области ядерной физики. Тяжёлые ионы используются в изучении *деления ядер*, свойств ядер вблизи границы устойчивости, в исследовании механизма взаимодействия сложных ядерных систем, состоящих из большого числа нуклонов, в к-рых проявляются коллективные эффекты, связанные со свойствами ядерной материи. Это позволяет получать важную физ. информацию не только в области ядерной физики, но и в физике твёрдого тела, астрофизике и др. Реакции с тяжёлыми ионами дают принципиальные возможности для синтеза тяжёлых элементов, включая синтез и изучение свойств сверхтяжёлых элементов.

Большие удельные потери тяжёлых ионов позволяют исследовать вещество в экстремальных состояниях, в условиях сверхвысоких темп-р и существенного изменения структуры материала. Эти уникальные свойства тяжёлых ионов дают возможность использования их для моделирования радиац. повреждений разл. материалов, подвергающихся воздействию больших нейтронных потоков в совр. ядерных реакторах, для глубокой послыонной имплантации в разл. вещества, включая монокристаллы, при создании прецизионных трековых мембран, в биофизике, биомедицине и т. д. Т. о., исследования с помощью тяжёлых ионов проводятся во мн. областях, связанных как с фундам. проблемами совр. ядерной физики, так и с решением прикладных задач.

**Методы генерации (получения) тяжёлых ионов.** Диапазон ускоряемых частиц и интенсивность пучка во многом определяются возможностями *ионных источников*. Для Т. и. у. используются источники высокозарядных ионов.

Вероятность образования иона с зарядом  $Z$  в результате одиночного электронного удара быстро уменьшается с увеличением  $Z$ , поэтому для получения достаточно эффективного выхода высокозарядных ионов используют процессы многократной ионизации. Для этого необходимо увеличить время пребывания ионов в облаке плазмы, содержащей горячие электроны. Темп-ра электронов  $E_e$  должна лежать в диапазоне кэВ ( $1 \text{ кэВ} \approx 10^7 \text{ К}$ ), если необходимо достичь больших значений  $Z$  и избежать процессов прямого захвата электронов (процесс рекомбинации). Кроме того, для образования высокозарядных ионов должно выполняться условие  $n/n_0 \gg 1$ , т. е. плотность плазмы  $n$  должна превосходить плотность нейтрального газа  $n_0$ , чтобы свести до минимума захват электронов в результате столкновений. Если обозначить концентрацию электронов в плазме  $n_e$ , а время её удержания  $\tau$ , то условия образования многозарядных ионов для трёх типичных случаев можно записать след. образом:

а) если  $n_e \tau \sim 10^8 \text{ с/см}^3$ ,  $E_e < 100 \text{ эВ}$ , то образуются тяжёлые ионы с малым  $Z$ ;

б) многозарядные ионы лёгких элементов с макс.  $Z$  (полная обдирка) образуются, если  $n_e \tau \sim 10^{10} \text{ с/см}^3$ ,  $E_e < 5 \text{ кэВ}$ ;

в) многозарядные ионы тяжёлых элементов с большим  $Z$  образуются при  $n_e \tau \sim 10^{13} \text{ с/см}^3$ ,  $E_e \sim 40 \text{ кэВ}$ .

Эти условия реализуются в той или иной степени в разл. конкретных типах источников.

**Дуоплазматрон (DP).** В источнике этого типа разрядный столб зажигается между катодом и анодом сквозь канал промежуточного электрода. В зазоре анод — промежуточный электрод за счёт сильного неоднородного радиально-симметричного магн. поля, создаваемого наконечниками электродов, образуется плотная анодная плазма, обладающая повышенной по сравнению с катодной плазмой темп-рой вторичных электронов. Эти электроны ионизируют рабочее вещество вплоть до образования многозарядных ионов. Осн. параметры DP:  $n_e \tau \sim 10^8 \text{ с/см}^3$ ,  $E_e = 10 \text{ эВ}$ , длительность импульса 1 мс, частота повторения 100 Гц. Однако возможности DP ограничены из-за малой величины  $n_e \tau$ , поэтому он в осн. используется как источник низкозарядных ионов для инжекторов *линейных ускорителей* (для малых  $Z$  он позволяет получать большие импульсные интенсивности пучка).

**Дуговой источник (PIG).** В дуговом источнике образование многозарядных ионов происходит в плазменном разряде за счёт ступенчатой ионизации ( $\sim 100$  мкс) нейтрального газа электронами, осциллирующими в магн. поле в промежутке катод — антикатод. Осн. параметры PIG:  $n_e \tau \sim 10^9 \text{ с/см}^3$ ,  $E_e \sim 100 \text{ эВ}$ , длительность импульса 1—3 мс при частоте повторения импульсов 100—200 Гц. В плазменном разряде источника PIG в результате ионной бомбардировки происходит интенсивное разрушение материала катода и антикатада, вследствие чего срок службы источника обычно не превосходит 25—30 ч. Тем не менее источник данного типа позволяет получать в определ. диапазоне зарядового спектра наиб. интенсивности пучков ионов из веществ, находящихся как в газовой, так и твердотельной фазах.

**Источник с электронно-циклотронным резонансом (ECR).** Этот тип источника — двухступенчатый. В первой ступени с помощью электронов, разогретых за счёт передачи энергии вынужденных СВЧ-колебаний на ларморовской электронной частоте  $f_n$ , создаётся низкозарядная плазма при давлении  $10^{-2} - 10^{-3}$  тор (подводимая мощность СВЧ  $< 0,5 \text{ кВт}$ ,  $f_n = 6,4 - 16 \text{ ГГц}$  для разл. типов конструкций). Во второй стадии создаётся давление  $\sim 10^{-7}$  тор, холодная плазма диффундирует в зеркальную *магнитную ловушку*, где за счёт электронно-циклотронного резонанса (мощность СВЧ 1—1,5 кВт) энергия электронов плазмы повышается до 1—10 кэВ. Магн. ловушка в зоне ионизации плазмы быстрыми электронами увеличивает время их взаимодействия с ионами до 10—50 мс ( $n_e \tau \sim 10^{10} \text{ с/см}^3$ ) и заметно повышает заряд ионов. Источник прекрасно воспроизводит характеристики пучка, обладает высокой надёжностью в работе и большим сроком службы.

**Лазерный источник (ЛИМЗ).** В источнике этого типа в результате взаимодействия сфокусированного лазерного излучения с поверхностью мишени создаётся плазменный факел с высокими темп-рой и плотностью электронов, поглощающий осн. часть световой энергии. В нём за времена  $\sim 1$  мкс происходят ионизация и образование *многозарядных ионов*. Осн. параметры лазерного источника при использовании  $\text{CO}_2$ -лазера:  $n_e \tau \sim 10^{11} \text{ с/см}^3$ ,  $E_e$  до 100 эВ, длительность импульса 1—10 мкс при частоте повторения импульсов 1 Гц. Источник позволяет получать высокозарядные ионы с относительно большой интенсивностью пучка в импульсе, поэтому он применяется в ускорителях импульсного действия (синхротроны, накопительные кольца).

**Электронно-лучевой источник (EBIS).** В этом источнике образование высокозарядных ионов происходит в результате длительного (сотни мс) времени взаимодействия низкозарядных ионов с интенсивным электронным пучком с энергией в неск. десятков кэВ и плотностью тока до  $1000 \text{ А/см}^2$ . Такие времена взаимодействия обеспечиваются удержанием ионов в потенц. яме, образованной в ради-